航路と浚渫窪地に着目した硫化物動態と青潮影響に関する考察

Analysis of Sulfide Dynamics Including Outbreak of Blue Tide in Navigation Channels and Dredged Trench of Tokyo Bay

市岡志保¹・佐々木 淳²・吉本侑矢³・下迫健一郎⁴・木村俊介⁵

Shiho ICHIOKA, Jun SASAKI, Yuya YOSHIMOTO
Kenichiro SHIMOSAKO and Shunsuke KIMURA

Blue tide, upwelling of anoxic water, is a serious water pollution problem in Tokyo Bay. To evaluate each source of anoxic water in navigation channels and dredged trenches, we first proposed a practical method for estimating the amount of sulfide in each water using a measured value of sulfide at the bottom and measured vertical profiles of pH and ORP. We then set an initial condition of sulfide distribution in each water and performed numerical simulation of upwelling of sulfide using a primitive equation model with nesting. Through the numerical experiments, we can evaluate the contribution of each water to the magnitude and area of the outbreak of blue tide along with its upwelling processes.

1. はじめに

東京湾等で問題となっている青潮の発生源となる無酸素水塊は湾奥平場の底層水、航路筋、および浚渫窪地に存在することが知られているが、硫化物モニタリングに多大のコストがかかることから、それぞれの水塊の青潮への寄与割合には不明な点が残されている(佐々木ら, 2007)。このような中、市岡ら(2008)は浚渫窪地を対象として、効率的かつ信頼性の高い硫化物濃度の推定法を提案し、浚渫窪地における硫化物動態についてはある程度のモニタリングが可能となっているが、航路筋については安全面から調査が困難なこともあって、データがほとんど存在せず、定量的な検討はなされていない。また、湾奥平場については空間スケールが大きく、水質場の時空間的変動が大きいことから、場全体における信頼性の高い硫化物動態のモニタリングは極めて困難である。

そこで本研究ではまず、信頼性の高いモニタリングが実現可能と考えられる、浚渫窪地と航路を対象とし、それぞれの水塊中における硫化物量の推定方法を確立し、2008年夏季の硫化物動態を明らかにする。次に、得られた結果を初期条件として用い、浚渫窪地および航路のそれぞれに起源を持つ硫化物の湧昇シミュレーションを実施することで、それぞれの水塊の青潮への寄与割合を定量的に評価する手法の確立を目指す。

2. 現地調査

(1) 調査の概要

図-1に示す東京湾奥部において、船橋航路、千葉航路、幕張沖浚渫窪地、および浦安沖浚渫窪地を含む測点を設定し、2007年8月から2008年10月まで、計19回の現地調査を実施した(2007年度は8月24日、8月30日、8月31日、9月20日、9月27日、10月1日、10月15日、10月29日の計9回、2008年度は7月8日、7月10日、7月29日、8月4日、8月21日、9月1日、9月2日、9月9日、9月11日、9月24日の計10回)。2007年度は図-1中の1~10の測点で調査を行い、2008年度にはY1~Y6の平場、およびa~fの航路の測点を追加した。ただし、測点1~7、および9とY1~Y6は平場、測点8は幕張沖浚渫窪地、測点10が浦安沖浚渫窪地、測点a~dが千葉航路、測点eおよびfが船橋航路である。

(2) 調査の方法

各調査点では多項目水質計(YSI社6600V2-4)を用いて、水温、塩分、深度、溶存酸素濃度(DO)、pH、酸化還元電位(ORP)、クロロフィル蛍光、および濁度について測定を行った。また、多項目水質計に採水器(離合社B号透明採水器5023-A)をくくりつけ、2007年度の調査ではDOが0.5mg/L以下、もしくはORPがマイナスの値を示した深度から海底直上まで、1~5m間隔で採水を行った。一方、2008年度の調査では、海底直上の1点のみにおいて採水を実施した。採水試料は直ちに酸素瓶に取り分け、酸化ナトリウムを添加して硫化物を固定し、調査終了後は直ちに横浜国立大学水理実験棟へ持ち帰った。これらの試料を用い、メチレンブルー吸光光度法(島津製作所UVmini-1240)によって硫化物濃度分析を行った。

1 修(工) 福山市庁
2 正会員 博(工) 横浜国立大学教授 大学院工学研究院
3 修(工) 高知県庁
4 正会員 博(工) 国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所長
5 国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所調査課長

図-1 東京湾奥部における現地調査測点

(3) 2008年の気象・海象状況

2008年の夏季は天候の変動が大きい年であった。6月は梅雨前線が日本列島南岸に停滞し、曇りや雨の日が多く、7月から8月前半にかけては、高気圧に覆われ、晴れて暑い日が続いた。また、8月後半から9月前半は大気の状態が不安定となることがあり、局地的な豪雨も見られた。

湾奥平場の貧酸素水塊については、例年並みの5月初旬に初めて観測され、5月中は貧酸素化が比較的弱く推移したが、6月になると湾奥中央部から北部を中心に貧酸素水塊が急速に拡大した。このため、6月～7月の貧酸素水塊は例年のほぼ2倍の規模と推測された。8月初めに貧酸素水塊が南下し、一部が内房から流出したため、いったん湾奥の貧酸素化は弱まったが、8月中旬には再び貧酸素水塊が拡大し、その後9月末まで例年並みの規模で推移した。2008年の青潮は8月下旬、9月上旬、および9月中旬に発生しており、特に8月下旬に発生した青潮は、当年最大の規模として報告がされている。

3. 浚渫窪地、航路における硫化物量の推定法

(1) 硫化物濃度の推定法

市岡ら(2008)はpH実測値と底層1点の硫化物濃度実測値を用いた、浚渫窪地における硫化物濃度の推定法を提案し、その妥当性を検証している(図-2)。ここでは本手法の内、pHおよびORP実測値を用いる推定法について整理しておく。

pH実測値を C_{pH} とすると、硫化物濃度推定値 C_{sul} は式(1)の形で精度よく推定できることが示されている。

$$C_{sul} = a(b - C_{pH})^{1.65} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、パラメータ b はORP実測値が0を下回ったときのpH実測値であり、 $C_{pH} = b$ のとき硫化物濃度が0となるように設定される。残ったパラメータ a は、底層1点におけるpH実測値と硫化物濃度の実測値から、式(1)

図-2 硫化物濃度の推定値と実測値の比較(市岡ら, 2008)

図-3 2008年の浚渫窪地および航路における硫化物総量の時系列(網掛けは青潮発生日)

を解くことで求められる。本手法はセンサー計測の可能なpHおよびORPの鉛直分布と底層1点における硫化物濃度の実測値から硫化物濃度を推定する手法であるが、公共用水域水質測定が多くでこれらの測定がなされていることから、硫化物モニタリング手法としても有効であると考えられる。

(2) 硫化物総量の推定

平面上1点における硫化物濃度の鉛直分布が既知の時、佐々木ら(2007)と同様に、浚渫窪地内での水質場の水平方向の一様性を仮定すると、各深度層における硫化物濃度とその層の水塊体積の積を取り、それらの総和を求めることで、浚渫窪地内の硫化物総量を求めることができる。本手法は航路においても同様に適用できるものと仮定し、航路(船橋および千葉)と浚渫窪地(幕張沖および浦安沖)における2008年の硫化物総量の時系列を図-3に示す。図中の網掛けは青潮発生時を示すが、8月下旬の青潮発生によって浚渫窪地水塊の硫化物が大きく減少する様子や、青潮後に航路の硫化物も減少している

図-4 東京湾計算領域：450m格子の大領域（左）と150m格子の小領域（右）

図-5 2008年の千葉灯標における水温、塩分時系列の計算値と実測値の比較

様子が捉えられている。一方、9月初旬の青潮は小規模なものであった上に、その発生直前の現地調査が行われなかったため、青潮発生による硫化物動態を捉えることはできていない。

4. 数値計算による検討

浚渫窪地および航路それぞれにおいて、現地調査結果より定量化した硫化物濃度の鉛直分布を初期条件として与え、その後の湧昇過程に関する数値シミュレーションを行う。これにより、対象とする個々の青潮事象について、それぞれの水塊による青潮への寄与を把握することができる。

(1) 計算方法の概要

流動モデルは吉本ら（2009）と同様に、デンマーク水理研究所（DHI）で開発されたMIKE3Dの準3次元パー

ジョンを採用し、硫化物については保存物質の移流・拡散過程として扱い、DHIのECO Labを用いてモデル化した。計算に際しては、まず、図-4に示す、東京湾全域（大領域）を水平450mの矩形格子、鉛直1m厚層の30層で分割し、2008年1月1日から9月30日までの流動場の再現計算を行った。次に図-4に示す小領域を水平150m格子で分割し、浚渫窪地および航路地形を可能な限り分解した。大領域の計算結果から初期条件および境界条件を与えることで、任意期間における小領域でのネスティング計算が行えるようにした。

小領域計算の初期条件として必要となる硫化物濃度は、対象とする青潮ごとに、幕張沖浚渫窪地、浦安沖浚渫窪地、千葉航路、および船橋航路それぞれにおいて、実測値と推定曲線から求めた硫化物濃度の鉛直分布を水平一様性を仮定して与えた。

(2) モデルの検証

本研究で対象とする2008年の流動場について、再現計算を行った。境界条件は吉本ら（2009）と同様、毎時の気象データ、河川流量の日別値、湾口における実測潮位および毎月の水温・塩分を内挿して与え、1月1日から9月30日までの計算を行った。千葉灯標の表層と底層における水温および塩分時系列の計算値と実測値の比較を図-5に示すが、計算値は実測値を概ねよく再現していると判断される。

(3) 青潮発生時の計算結果と考察

2008年9月11に発生した青潮に関してはその直前の9月9日に現地調査が実施されており、青潮発生直前の硫化物量の推定が可能である。そこで、この青潮を対象として、硫化物の湧昇シミュレーションを行うことにより、浚渫窪地および航路それぞれに起源を持つ硫化物による青潮の発生海域や発生規模に関する検討を行うこととした。まず、2008年の大領域再現計算結果を初期条件および境界条件として用い、2008年9月8日から9月15日までの1週間を対象として、小領域における湧昇計算を行った。小領域の計算に際しては、幕張沖および浦安沖の浚渫窪地、千葉および船橋航路、および湾奥平場に硫化物の初期値を設定し、これらすべての硫化物を考慮した湧昇計算を行うと同時に、それぞれの水塊による寄与を見るため、浚渫窪地のみに硫化物を与えた計算、航路のみに硫化物を与えた計算、および平場のみに硫化物を与えた計算を別途行った。

図-6に9月11日12時における、(a) 全硫化物起源を考慮した場合、(b) 浚渫窪地の硫化物のみを考慮した場合、(c) 航路の硫化物のみを考慮した場合、および(d) 湾奥平場の硫化物のみを考慮した場合それぞれの、表層における硫化物濃度計算値を示す。図-6 (a) の発生状況を見ると、浦安沖および幕張沖で相対的に高濃度の硫化物

図-6 2008年9月11日における、(a) すべての硫化物の湧昇計算結果、(b) 浚渫窪地の硫化物のみによる湧昇計算結果、(c) 航路の硫化物のみによる湧昇計算結果、(d) 湾奥平場の硫化物のみによる湧昇計算結果 (単位: mg/L)

図-7 2008年9月の9日、10日、11日、および12日における、図-4破線鉛直断面における硫化物濃度の計算値。(a) 9月9日、(b) 9月10日、(c) 9月11日、(d) 9月12日 (単位: mg/L)

が見られ、また、船橋航路および船橋港内においても比較的高濃度の硫化物が発生している様子が分かる。これを硫化物起源ごとの計算結果である図-6 (b), (c), (d)と比較すると、幕張沖および浦安沖浚渫窪地を硫化物の起源とする青潮が支配的であり、これらが幕張沖および浦安沖の高濃度の硫化物の主因であることが理解できる。一方、船橋航路を硫化物起源とする青潮の様子を見ると、船橋航路、船橋港内および西浜前面において硫化物濃度が比較的高濃度となっている。これは小規模な青潮でしばしば観察される、航路、港内で発生する青潮の主因が航路筋を起源とする硫化物によるものであることを示唆しているといえる。ただし、航路筋の硫化物を起源とする青潮水中の硫化物濃度はそれほど高い濃度とはなっておらず、環境影響は相対的に小さいと考えられる。ところで対象とした青潮については、湾奥平場の硫化物を起源とする青潮の寄与はほとんどないという結果が得られた。佐々木ら (2007) が示唆しているように、湾奥平場の硫化物量は時空間変動が極めて大きいものと推定され、対象とした青潮の発生直前には硫化物があまり見られなかったことを反映している。また、湾奥平場起源の硫化物の影響が小さかったことが対象とした青潮の規模が比較的小規模であったことの一つの要因であると推察される。

次に浚渫窪地および航路起源の硫化物の湧昇過程に関

する詳細を見るため、図-7に図-4のa-a'ラインの鉛直断面における、9月9日から9月12日までの硫化物濃度分布を示す。幕張沖浚渫窪地に着目すると、この間、14m以深の硫化物濃度分布に目立った変化がないことが分かる。従来から指摘されているように、夏季の浚渫窪地内の水塊は深度10m前後に存在する強い成層のため、極めて安定な水塊となっていることが知られているが、本計算でもそれと整合する結果となっている。また、図-3に示されているように、当該青潮の発生後にも浚渫窪地内の硫化物濃度の減少は見られず、青潮発生直後の減少分が小さく、青潮後日経ってから行われた次の現地調査時には、硫化物がすでに回復し、さらに蓄積が進んでいたものと推察することができる。一方、浦安沖浚渫窪地の硫化物はその多くが湧昇している様子が見られるが、浦安沖浚渫窪地の硫化物濃度がそれほど高濃度とはならない従来の結果と整合するものである。また、浦安沖浚渫窪地水塊を起源とする青潮の発生規模はそれほど大きいものではないことも示唆される。さらに、船橋航路筋の硫化物は当該青潮の発生後に消滅するという計算結果が得られているが、これも現地調査結果とよく整合している。

以上見てきたように、浚渫窪地および航路に関する硫化物濃度のモニタリングを実施し、その結果を初期条件とした硫化物の湧昇に関する再現計算を行うことで、そ

れぞれの水塊を起源とする青潮の発生域や発生規模に関する検討を行うことができるようになった。一方、湾奥中央平場水塊については、広域でかつ硫化物濃度の時空間変動が大きいことから、モニタリングが困難であり、本研究の枠組みで信頼性の高い青潮再現計算を行うことは困難である。逆に、青潮発生時の現地調査からイオウ濃度分布を把握し、数値計算結果との比較と、湾奥平場における入手可能な実測データから、湾奥平場水塊の寄与について、間接的に推量するのが有効であると考えられる。

5. 結論

東京湾奥部の浚渫窪地、航路、および平場を対象とし、2007年および2008年の夏季を中心として硫化物を含む多項目の水質調査を実施し、特に航路および浚渫窪地における実用的な硫化物濃度の推定法と硫化物量の見積もり方法を提示し、これが浚渫窪地と航路における硫化物濃度分布の推算に有効であることを示した。また、本手法は底層1点の硫化物実測値とセンサー計測が可能なpH、ORPの鉛直分布を用いたものであり、多くの公共用水域水質測定の実績で計測されていることから、実用性の高い手法であるといえる。さらに、本硫化物モニタリングと硫化物の湧昇再現計算を組み合わせることで、個々の青潮について、硫化物起源としての各水塊の寄与割合を定量的に評価することが可能となった。さらに、計算

結果と実際の青潮発生規模の比較を通して、湾奥中央平場の底層水の寄与割合についても間接的にはあるが推量することが可能となった。

謝辞：調査に際しては、国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所前所長の諸星一信博士をはじめとする、職員各位のご協力と、横浜国立大学水環境研究室の学生各位の助力を得た。また、国土交通省同事務所の環境調査船および八幡橋鴨下丸を利用させていただいた。本研究で使用したMIKE3はデンマーク水理環境研究所（DHI）より横浜国立大学に対し使用を許諾して頂いた。ここに記し、謝意を表する。本研究の一部は2007年度～2010年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（B）課題番号19360220によるものである。

参 考 文 献

- 市岡志保・佐々木 淳・吉本侑矢・松坂省一・有路隆一・諸星一信（2008）：東京湾奥部の浚渫窪地における硫化物量の簡易推定手法の提案，海洋開発論文集，Vol. 24, pp. 669-674.
- 佐々木 淳・川本慎哉・吉本侑矢・石井光廣・柿野 純（2007）：東京湾の青潮に及ぼす平場と浚渫窪地水塊の影響評価，海岸工学論文集，第54巻，pp. 1041-1045.
- 吉本侑矢・佐々木 淳・下迫健一郎・木村俊介（2009）：浚渫窪地における導水を用いた貧酸素改善に関する検討，海岸工学論文集，第56巻（印刷中）。